

Determinación de ciclos de conducción en rutas urbanas fijas



Felipe Jiménez-Alonso
Alfonso Román-de Andrés
José María López-Martínez

Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

Universidad Politécnica de Madrid. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA). Campus Sur de la UPM. Carretera de Valencia, km. 7. Madrid.
Tfno: +34 913 365317. felipe.jimenez@upm.es

ANALYSIS OF DRIVING CYCLES IN FIXED URBAN ROUTES

ABSTRACT

- A widespread approach for evaluating vehicle fuel consumption and pollutant emissions is by reproducing standard driving cycles. It is therefore essential that these cycles represent the actual behavior of the vehicle. Some types of vehicles have specific kinematic cycles, such as those traveling on fixed urban routes, although these are usually evaluated as if all itineraries share similar characteristics, which is a major constraint. This paper presents a methodology for the construction of polygonal standard driving cycles applicable to this kind of vehicles and explicit for each group of routes with analogous kinematic characteristics. The methodology comprises the data processing for the operation, the clustering of the itineraries and the structure of the representative cycle for every group. The algorithms have been successfully applied on a sample of city buses in Madrid.
- **Keywords:** Driving cycle, speed, consumption, exhaust emissions, urban bus, cluster.

RESUMEN

Una forma usual para la evaluación del consumo y emisiones de los vehículos es mediante la reproducción de ciclos estándar de conducción. Así pues, es esencial que estos ciclos se ajusten al comportamiento real de los vehículos. Algunos tipos de vehículos presentan ciclos cinemáticos específicos, como son los vehículos que recorren rutas urbanas fijas, para los que suele considerarse que todos los itinerarios comparten características semejantes, lo cual supone una importante limitación. Este artículo presenta una metodología para la construcción de ciclos de conducción poligonales estándar aplicables a estos vehículos, y determinados para cada grupo de rutas de características cinemáticas semejantes. La metodología integra el tratamiento de los datos de operación, agrupamiento de rutas y construcción del ciclo. Los algoritmos han sido aplicados satisfactoriamente sobre una muestra de líneas de autobuses urbanos en Madrid.

Palabras clave: Ciclo de conducción, velocidad, consumo, emisiones, autobús urbano, conglomerado.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo y las emisiones contaminantes están teniendo una influencia fundamental en la toma de decisiones relativas a la movilidad urbana. Las metodologías de cálculo de emisiones comúnmente empleadas están basadas en la utilización de la velocidad media como parámetro de definición del ciclo de operación, lo cual se considera útil cuando es aplicado a áreas geográficas extensas durante amplios intervalos temporales, pero su precisión disminuye de forma significativa en zonas de menor tamaño. Por otra parte, [1] establece que los factores de consumo y emisión son constituidos en base a ciclos de operación particulares. Según [2], un ciclo de conducción es un recorrido estándar que permite la caracterización del consumo de com-

bustible y de las emisiones contaminantes de un vehículo. La definición de estos ciclos implica el estudio de la evolución de la velocidad con el tiempo.

Así, resulta esencial que los ciclos utilizados sean una representación fidedigna de las condiciones existentes en la operación real del vehículo, pues el consumo de combustible y las emisiones contaminantes están influenciadas por los patrones de conducción [3-5] y los resultados obtenidos en las comparativas entre diversas tecnologías y tipos de combustibles pueden depender del tipo de ciclo utilizado [6]. Sin embargo, la definición de ciclos no es sencilla, pues influyen aspectos como que los estilos de conducción de los conductores son diferentes [7,8] y que las condiciones del tráfico dependen del lugar concreto, no sólo de si se trata de áreas urbanas o interurbanas, y son variables en el tiempo. Además, la aplicación a ciudades concretas supone, inevitablemente, la generación de errores debidos a las peculiaridades de cada entorno [9-11].

A lo largo de los años y en diferentes ámbitos, se han desarrollado ciclos de conducción para representar las condiciones de circulación de los vehículos con la mayor exactitud posible. Algunos de los más comúnmente empleados son el Ciclo Europa (ECE15), ciclo que ha sido criticado por las aceleraciones excesivamente suaves, pues utiliza un rango muy restringido de funcionamiento del motor y subestima la carga del tráfico real [12,13], o el ciclo ARTEMIS [1], que incluye ciclos urbanos e interurbanos con una estructura de sub-ciclos que permiten la desagregación según condiciones de conducción específicas. El ciclo US FTP72 (LA-4) fue diseñado para reproducir las condiciones del tráfico en Los Ángeles. A partir de éste se obtiene el ciclo US FTP75 que es empleado en EEUU para la certificación de emisiones de vehículos. Sin embargo, en casos concretos, las condiciones prescritas por este ciclo no se corresponden con las típicas de funcionamiento y podrían aplicarse ciclos estacionarios como los definidos en ISO 8178-4 C1 8, ISO 8178-4 D2, o ISO 8178-4 E4/E5. El ensayo US06 considera patrones de conducción más agresivos, siendo desarrollado el *Highway Fuel Economy Cycle* para evaluar el consumo y las emisiones en condiciones casi estacionarias de circulación por autopista. Adicionalmente, con el fin de representar una utilización mixta, el *Unified Driving Cycle* (LA-92) incluye zonas urbanas e interurbanas. Otros ciclos son el Seul 14-mode cycle [14] y el ciclo desarrollado para Sydney [15]. Para tráfico urbano, procede mencionar los ciclos Japan 10-mode y 11-mode [16] y el construido con las mediciones realizadas en Madrid [17]. En la actualidad, las emisiones de los motores de los vehículos comerciales de carretera en Europa están reguladas por la Directiva 88/77 CE, la cual ha sido modificada sustancialmente en varias ocasiones para introducir valores límite de emisiones contaminantes cada vez más estrictos. La medición de emisiones para las pruebas de homologación de los motores diesel de vehículos pesados debe efectuarse conforme a tres tipos de pruebas: *European Stationary Cycle* (ESC), *European Transient Cycle* (ETC) y *European Load Response Test* (ELR). Los ciclos ETC y ESC

sustituyeron al ensayo ECE R49 13 Mode para la homologación de vehículos pesados, pues este ensayo no representaba adecuadamente las condiciones típicas de funcionamiento. Para vehículos comerciales ligeros se utiliza el *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC).

Sin embargo, la validez de muchos de los anteriores ciclos es limitada cuando son aplicados a situaciones con peculiaridades concretas, como el caso de los autobuses urbanos o los camiones de recogida de residuos, pues tienen un ciclo muy definido a lo largo de rutas fijas. Este hecho ha motivado el desarrollo de ciclos específicos que pretenden reproducir la operación de estos vehículos.

En [18], se hace referencia a la escasez de trabajos que estudian el funcionamiento de los autobuses. Así pues, resulta destacable el ciclo *Braunschweig*, utilizado en Europa para evaluar el funcionamiento de vehículos pesados en régimen transitorio. Este ciclo simula una conducción urbana transitoria y con paradas frecuentes, habiendo sido empleado en diversos proyectos de investigación [19], así como en programas de certificación, si bien con la introducción del ciclo estacionario ETC, su relevancia tiende a disminuir. El ciclo *US Orange County* tiene mayores cargas, lo que ocasiona que las emisiones sean diferentes, aunque sí parecidas. A partir de los datos medidos en autobuses en cuatro ciudades holandesas, [20] propusieron otro ciclo. Por otra parte, en [21] desarrollaron ciclos de conducción de autobuses, estableciendo patrones diferenciados según la zona por la que circulan los vehículos y distinguiendo secciones con características internas específicas. El estudio [22] analizó datos del funcionamiento de los autobuses urbanos en tres líneas de Madrid como longitud de tramos, número de paradas, duración de las detenciones, velocidad máxima, aceleraciones, etc., construyéndose un ciclo poligonal basado en aceleraciones y deceleraciones constantes y en velocidades máximas en cada segmento, dependientes de la longitud del tramo y de una constante característica de cada línea. Otro enfoque para la misma ciudad es abordado por [23] y consiste en generar ciclos basados en medidas experimentales, con una distribución de las parejas velocidad-aceleración cercana a la presentada por toda la muestra, minimizando el error cuadrático medio entre frecuencias en la distribución real y en la muestra seleccionada. Las principales conclusiones obtenidas indican que el efecto de diferentes modelos de autobús no es significativo sobre el ciclo y que la influencia de las diferencias entre líneas es mucho más acusada que las distinciones entre franjas horarias. [24] emplea, en la comparativa de dos tecnologías para el control de las emisiones, un ciclo que incluye zonas de circulación a baja velocidad y otras de alta velocidad por autovía, diseñado en base a la experiencia de la *Empresa Municipal de Transporte* (EMT) de Madrid.

El estudio de estos trabajos previos permite observar la ausencia de una metodología sistemática de análisis para la identificación de los ciclos de operación característicos de las flotas de determinados tipos de vehículos, pues están basados únicamente en una muestra limitada de líneas y

consideran que todas tienen características semejantes. En este sentido, cabe indicarse que no todas las rutas de la flota dentro de una ciudad tienen las mismas propiedades. En consecuencia, la consideración de un único ciclo podría ser una simplificación excesiva e impediría analizar la operación de diversas tecnologías de vehículos en cada recorrido tipo durante procesos de reorganización de flotas o de compra de nuevos vehículos empleando criterios de ahorro de consumo y reducción de emisiones, por ejemplo.

2. MÉTODO

Este artículo propone una metodología para la construcción de ciclos de conducción que permitan simular la operación de una flota de vehículos que recorre un conjunto de rutas fijas urbanas, identificando y discriminando las diferencias que existen entre los distintos itinerarios, evaluando sus parámetros cinemáticos característicos y posibilitando que sean fácilmente repetibles en un banco de ensayos. Para lograr el anterior objetivo, teniendo en cuenta las fases indicadas por [1] para la construcción de ciclos, el procedimiento establecido incluye las siguientes etapas:

- 1. Medición de los ciclos cinemáticos en las rutas recorridas por la flota de vehículos.
- 2. Segmentación de los registros en microciclos y caracterización de sus principales propiedades.
- 3. Agrupación de las líneas en conjuntos con propiedades cinemáticas homogéneas.
- 4. Construcción del ciclo cinemático correspondiente a cada conglomerado de líneas.

Seguidamente se describen las anteriores etapas. Además, la metodología es contrastada utilizando datos reales medidos sobre un conjunto de líneas de autobuses urbanos en Madrid.

2.1. MEDICION DE CICLOS DE CONDUCCION

Como se ha indicado, los ciclos cinemáticos estándar están definidos como la evolución de la velocidad con respecto al tiempo. Por ello, la variable fundamental que debe ser adquirida para el estudio del funcionamiento de los vehículos es su velocidad. El estudio de otras variables, como la carga, resultaría relevante para la aplicación del ciclo en ensayos o estimaciones posteriores, si bien, no tanto para la definición de los propios ciclos. La caracterización cinemática de los autobuses en las diferentes líneas ha sido realizada mediante un equipo embarcado. Resulta fundamental recopilar dicha información en las condiciones más cercanas a las reales, por lo que se emplea un equipo oculto para evitar que el conductor modifique sus hábitos de conducción [25]. El dispositivo de registro funciona de forma autónoma, sin intervención externa, registra señales tanto analógicas como digitales e incluye un acelerómetro interno. Las señales recopiladas son:

- Llave de contacto que activa o detiene el registro de datos.

- Señal de velocidad, adquirida del cuadro de instrumentos del vehículo y previamente calibrada con un sensor de velocidad sin contacto L-CE Correvit.
- Distancia recorrida, también obtenida del cuadro de instrumentos.
- Indicador de sentido de línea, que permite determinar el inicio y final del recorrido.

2.2. ANALISIS DE LOS CICLOS CINEMATICOS

El ciclo de operación se divide en zonas de movimiento y de parada, considerándose como microciclo a la evolución de la velocidad entre dos detenciones consecutivas. Puesto que se pretende obtener ciclos de velocidad poligonales, los registros continuos son divididos en microciclos compuestos por tramos de aceleración, velocidad y deceleración constantes, y se definen las variables indicadas en la tabla 1, realizándose además la clasificación mostrada en la tabla 2 de tipologías de microciclos.

Globales	Tipo
	Duración
	Velocidad media
	Velocidad máxima
Aceleración	Duración de la primera aceleración
	Tiempo total en aceleración
	Aceleración inicial
Velocidad constante	Duración del último tramo con velocidad constante
	Tiempo total a velocidad constante
	Velocidad del último tramo con velocidad constante
Deceleración	Duración de la última deceleración
	Tiempo total en deceleración
	Última deceleración

Tabla 1: Variables analizadas en los microciclos

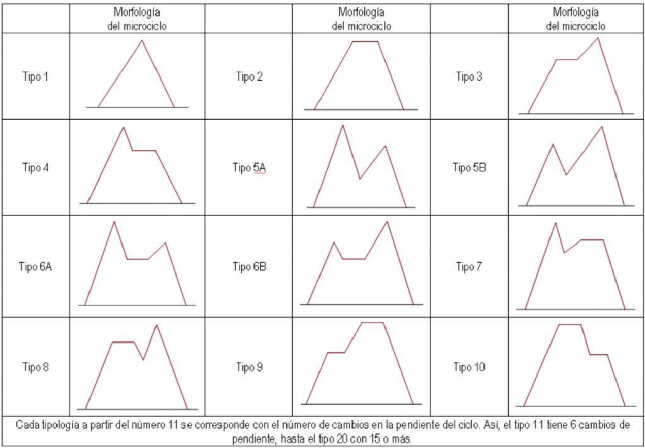


Tabla 2: Clasificación de microciclos según el perfil de velocidad

2.3. AGRUPACION DE LAS LINEAS EN BASE A LAS CARACTERISTICAS DE LOS MICROCICLOS

En situaciones en las que es necesaria la agrupación de rutas, se suele recurrir a parámetros macroscópicos de funcionamiento, como velocidades promedio de recorrido, nú-

mero de paradas, niveles de ocupación, etc. Sin embargo, este enfoque tiene una clara limitación, pues se prescinde de gran cantidad de información relativa al movimiento real de los vehículos que resulta determinante para la estimación de consumos y emisiones. Por ello, el enfoque seguido parte de los registros cinemáticos y emplea técnicas de minería de datos [26] con el fin de lograr la agrupación de itinerarios mediante el análisis de las características microscópicas de los microciclos. En primer lugar, es preciso evaluar el grado de similitud entre las distintas rutas. La semejanza existente entre los recorridos se evalúa utilizando la *teoría de contraste de hipótesis* [27]. Así, para cada itinerario y para cada variable previamente definida, se obtiene el valor medio de la misma y se calculan las frecuencias de distribución de la variable en un histograma de cinco intervalos, ajustándose los límites de dichos intervalos a los valores adoptados por cada variable. La proporción en la que aparece cada tipo de microciclo también es analizada. Por tanto, entre cada pareja de rutas, se verifican las siguientes hipótesis nulas:

- Igualdad de medias para cada variable.
- Igualdad de proporciones en cada intervalo de histograma para cada variable.
- Igualdad de proporciones de cada tipología de microciclo.

A partir de dichos contrastes se calcula una matriz simétrica de índices de semejanza que contiene el resultado de la comparativa. Cada elemento de esta matriz tiene un valor comprendido en $[0,1]$, correspondiente a la proporción de contrastes que aceptan la hipótesis nula frente al total, incluyendo factores de ponderación que denotan la importancia de cada variable. Así, el elemento de la matriz M_s que compara la ruta i con la j está dado por la siguiente expresión:

$$M_s(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^N \left(c_k^m \cdot h_{ijk}^m + \sum_{l=1}^5 c_{kl}^p \cdot h_{ijkl}^p \right) + \sum_{q=1}^M c_q^t \cdot h_{ijq}^t}{\sum_{k=1}^N \left(c_k^m + \sum_{l=1}^5 c_{kl}^p \right) + \sum_{q=1}^M c_q^t} \quad (1)$$

donde N es el número de variables, M es el número de tipos de microciclos, c^m es el factor de ponderación del contraste de la media, c^p es el factor de ponderación de los contrastes de proporciones de la distribución de las variables, c^t es el factor de ponderación de los contrastes de proporciones de la distribución de tipos de microciclos, h^m vale 1 cuando se acepta la hipótesis nula del contraste de medias y 0 cuando se rechaza, h^p vale 1 cuando se acepta la hipótesis nula del contraste de proporciones de la distribución de las variables y 0 cuando se rechaza, h^t vale 1 cuando se acepta la hipótesis nula del contraste de proporciones de cada tipo de microciclo y 0 si es rechazada.

El método más sencillo de agrupamiento consiste en analizar todas las posibles combinaciones de líneas, conocidos el número de éstas y el de conglomerados a formar. Su principal inconveniente estriba en el significativo volumen com-

putacional requerido para generar todas las combinaciones (el número de conglomerados elevado al número de líneas), limitando su capacidad para resolver problemas representativos, lo que motiva recurrir a métodos aproximados. Así, se ha desarrollado el método de los conglomerados jerárquicos, algoritmo iterativo que permite realizar la agrupación secuencial de líneas en conglomerados. Inicialmente, cada agrupamiento contiene un solo elemento (es decir, originariamente hay igual número de conglomerados que de líneas). Cada etapa requiere calcular todas las posibles combinaciones de dos conglomerados que puedan ser formadas a partir de agrupamientos ya existentes. A continuación, siguiendo un criterio selectivo preestablecido, se selecciona la mejor combinación, de manera que cada paso conlleve la unión de dos conglomerados. Este proceso se repite hasta que el número de conglomerados es el deseado. El diagrama del algoritmo es mostrado en la figura 1.

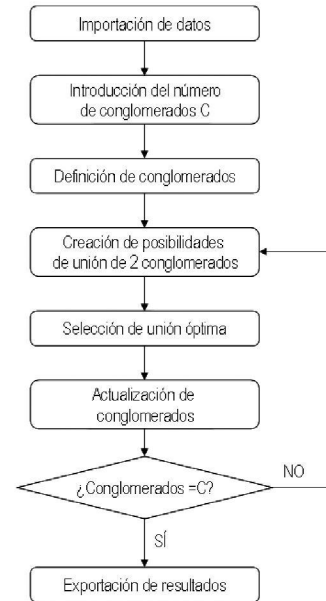


Fig. 1: Diagrama de flujo para el método jerárquico

El criterio de optimización utilizado consiste en maximizar el mínimo valor de los índices de semejanza entre las líneas incluidas en un mismo grupo, con lo que se garantiza una “calidad” aceptable en las agrupaciones, evitando juntar rutas cuya semejanza sea muy baja.

Con el fin de analizar la bondad del agrupamiento, se definen una serie de indicadores:

- Indicador de valor promedio del índice de semejanza (ps) que se calcula promediando los índices de semejanza de todas las comparaciones que puedan ser realizadas entre las líneas de cada conglomerado:

$$ps = \frac{\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^{S_i} M_{S_{abj}}}{\sum_{i=1}^C S_i} \quad (2)$$

donde C es el número de conglomerados, S_i es el número de comparaciones diferentes en el conglomerado i y M_{sab} denota de forma genérica los términos de la matriz de semejanza de las anteriores comparaciones en cada conglomerado.

- Indicador de valor mínimo del índice de semejanza (ms) que corresponde al valor del elemento de la matriz de semejanza con menor cuantía y que interviene en las comparaciones entre las líneas:

$$ms = \min(M_{sab}) \quad (3)$$

- Adicionalmente, se establece como requerimiento que, al disminuir el número de conglomerados, no queden alterados los agrupamientos previamente formados. Este requisito se cumple de forma intrínseca dada la propia concepción del algoritmo, lo que supone una condición que favorece la agregación de nuevas líneas a grupos ya formados.

2.4. CONSTRUCCIÓN DE LOS CICLOS CINEMATICOS

La síntesis de ciclos de conducción poligonales consiste en concatenar microciclos de manera que se mantengan las proporciones de tipos y características presentes en la realidad. De esta forma, se seleccionan los microciclos más frecuentes, siendo cada patrón repetido con una frecuencia que sustente la relación de proporciones existente con el resto de tipos en las mediciones reales.

Dada la alta variabilidad exhibida en las frecuencias relativas de los diferentes tipos de microciclos, el algoritmo de construcción de los ciclos establece dos categorías:

- Clase A: Tipos de microciclos con frecuencias relativas altas (superiores al 10%).
- Clase B: Tipologías con frecuencias relativas bajas.

El tratamiento de cada clase es diferente. Así, en los ciclos de clase A se analiza la frecuencia de cada posible configuración de sus variables independientes, estableciéndose 5 intervalos para cada variable. Por ejemplo, en el caso de los microciclos tipo 1, definidos por 3 variables independientes, se estudia la frecuencia relativa con la que sus 125 (5^3) configuraciones aparecen en los registros. A partir de dicha distribución de frecuencias, las configuraciones más representativas son seleccionadas. El número de repeticiones de cada configuración debe ser tal que se mantengan las relaciones entre sus frecuencias relativas. En los microciclos de clase B, sólo la configuración con mayor frecuencia es elegida, siendo ésta la que represente a dicha tipología, repitiéndose las veces necesarias para que la relación de frecuencias con los demás tipos de microciclo sea coherente con los registros experimentales. Esta solución se adopta puesto que la representatividad global de las configuraciones de los microciclos clase B suele ser excesivamente baja, no procediendo la segmentación efectuada con los de clase A.

En ambos casos, los ciclos estándar son contruidos a partir de las variables independientes. Según lo anterior, se adoptará como unidad de medida (microciclo poligonal con una sola replicación en el ciclo generado), el microciclo con menor frecuencia, comparando para ello las frecuencias de los restantes microciclos elegidos correspondientes a los grupos de clase A y las frecuencias relativas de los clase B, es decir:

$$f_u = \min(f_{Aik}, f_{Bj}) \quad i = 1 : I; \quad j = 1 : J; \quad k = 1 : K_i \quad (4)$$

donde I es el número de tipos de microciclos incluidos en la clase A, J el número de tipos de microciclos incluidos en la clase B, $I + J$ es el número de tipos de microciclos considerados en el estudio, K_i es el número de configuraciones consideradas en los microciclos tipo i pertenecientes a la clase A, f_{Aik} es la frecuencia de cada configuración k de las variables independientes definidas en el microciclo de tipo i perteneciente a la clase A, y f_{Bj} es la frecuencia del tipo de microciclo j , perteneciente a la clase B, cumpliéndose:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} f_{Aik} + \sum_{j=1}^J f_{Bj} = 1 \quad (5)$$

Mediante este algoritmo se pretende seleccionar los microciclos más frecuentes, manteniéndose las proporciones entre sus diferentes tipos. Las siguientes relaciones deberán ser respetadas al comparar los datos reales con los del ciclo generado.

- Relación de frecuencias entre configuraciones pertenecientes a un mismo tipo de clase A	$\frac{f_{Aik}}{f_{Aip}}$
- Relación de frecuencias entre tipos de microciclos de clase A o clase B	$\frac{f_{Ai}}{f_{Ax}}, \frac{f_{Bj}}{f_{By}}$
- Relación de frecuencias entre cada tipo de microciclo de clase A y cada tipo de clase B	$\frac{f_{Ai}}{f_{Bj}}$

Por último, los microciclos en parado son intercalados entre los de movimiento de manera que preserven la distribución de tiempos en detención obtenida en los registros.

3. RESULTADOS

El procedimiento descrito ha sido aplicado a un conjunto de 25 líneas recorridas por los autobuses urbanos de Madrid. Esta elección trata de cubrir las principales áreas de la ciudad (figura 2), considerándose, según la experiencia de la Empresa Municipal de Transportes, que recoge toda la casuística posible de la ciudad, con longitudes de línea comprendidas entre 3 y 16.5 km y velocidades promedios de recorrido entre 10 y 27 km/h.



Fig. 2: Distribución geográfica de las líneas de autobús analizadas

Durante el proceso de medición se ha registrado el funcionamiento de un vehículo en cada línea durante una semana completa, totalizando más de 1000 horas de datos.

El punto de partida para los algoritmos de agrupamiento de las rutas consiste en calcular la matriz de semejanza, empleándose un índice de significación de 0.01. Los elementos de la matriz obtenida están comprendidos entre 0.978 y 0.235. Posteriormente, siguiendo el método descrito en el apartado 2.3, se ha realizado la formación de conglomerados desde 15 hasta 2. Los valores de los indicadores de calidad obtenidos son mostrados en la figura 3.

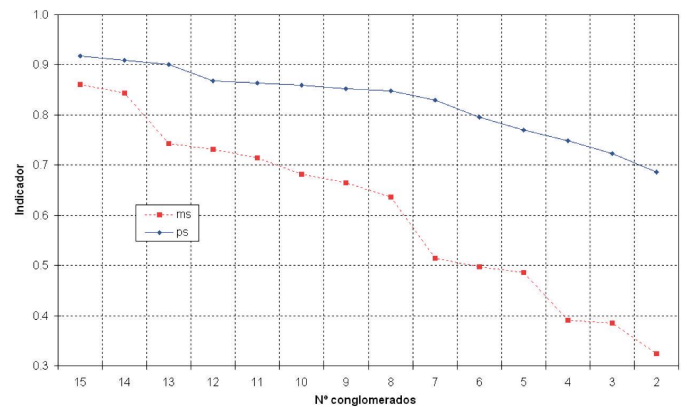


Fig. 3: Indicadores de calidad de los agrupamientos de líneas

Nótese que este procedimiento permite determinar cual sería la opción preferible en el número de conglomerados cuando éste no estuviese predefinido. El número de conglomerados se considera adecuado cuando la pendiente de caída posterior incrementa de forma significativa en valor absoluto. En el caso expuesto, esa situación ocurre con el indicador *ms* al pasar de 8 a 7 agrupamientos, y de 7 a 6 conglomerados al analizar la evolución de *ps*, (el resto de cambios bruscos se producen para números de conglomerados demasiado altos o bajos). Según lo anterior la elección de 8 conglomerados es coherente en ambos indicadores.

El procedimiento concluye con la construcción del ciclo completo característico de cada conglomerado. Para ello, se emplean los tipos de microciclos comprendidos entre las tipologías 1 y 10. Además, se comprueba que sólo las frecuencias relativas de los tipos de microciclos 1 y 2 son muy superiores al 10% en todos los conglomerados, con lo que serán definidos como ciclos de tipo A. La tabla 3 muestra las

Conglomerado	1	2	3	4	5	6	7	8
Duración del ciclo (s)								
Movimiento	1984.5	1867.4	2824.5	2969.6	2007.8	2615.8	2785.0	1527.1
Parado	1493.0	1600.0	2096.0	2348.0	1267.0	1680.0	1540.0	714.0
Total	3477.5	3467.4	4920.5	5317.6	3274.8	4295.8	4325.0	2241.1
Número de microciclos de cada tipo								
Tipo 1 *	30 (5)	36 (3)	53 (5)	65 (6)	27 (3)	42 (6)	39 (7)	11 (3)
Tipo 2 *	14 (12)	14 (10)	15 (11)	15 (13)	15 (12)	15 (12)	15 (9)	15 (12)
Tipos 3 a 10 *	16 (7)	13 (8)	18 (8)	18 (6)	16 (8)	22 (8)	20 (8)	10 (8)
Porcentaje de microciclos de tipo 11 o superior no considerados								
	7.8%	6.6%	6.0%	4.2%	11.2%	18.0%	37.2%	19.2%
Índice de semejanza entre el ciclo estándar y los datos experimentales								
	0.844	0.676	0.804	0.810	0.698	0.637	0.508	0.709

* En primer lugar se indica el número total y, entre paréntesis, el número de microciclos diferentes.

Tabla 3: Características de los ciclos completos generados

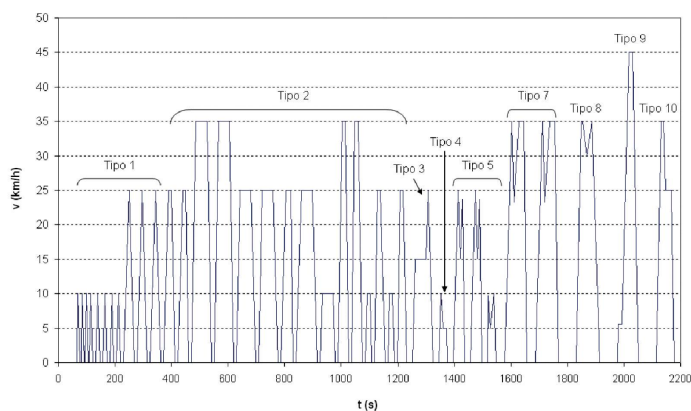


Fig. 4: Representación gráfica del ciclo completo del conglomerado 8

características principales de los ciclos completos generados y la figura 4 presenta el ejemplo de uno de los ciclos estándar construidos. Para que resulten comparables los resultados, se ha escogido un número aproximadamente fijo de microciclos de tipo 2 (14 o 15, según los casos debido a diferencias en los redondeos), a partir del cual se han mantenido las proporciones de los demás tipos. Los resultados obtenidos revelan la importante diversidad existente entre los distintos conglomerados. Así, la duración total del ciclo oscila entre 0.62 horas y 1.48 horas, valores que están en el orden de magnitud de otros ciclos estándar empleados en la actualidad.

La validación de los resultados se realiza comparando los valores de las variables características de los microciclos de los ciclos estándar generados y los datos experimentales de cada conglomerado. Así, la figura 5 ilustra el registro de las desviaciones de las variables más relevantes. Además, para cada conglomerado se calcula el índice de semejanza resultante de la comparación del ciclo construido y de las mediciones reales (tabla 3). Los resultados permiten observar que algunos conglomerados (especialmente 1, 3 y 4) ofrecen resultados muy ajustados a los datos medidos, con diferencias inferiores al 10% en todas o casi todas las variables. Esto ocurre principalmente en aquellas líneas en las que los ciclos

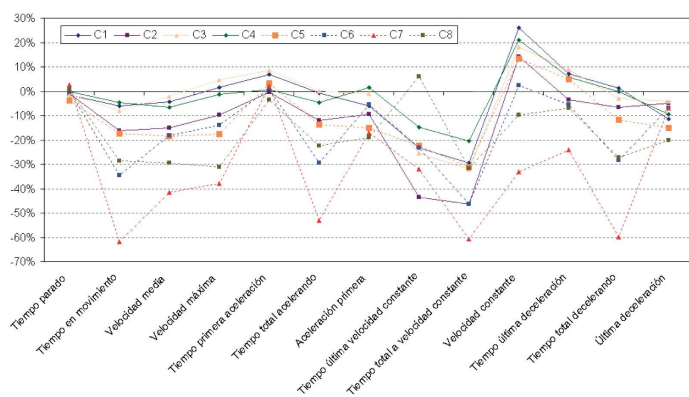


Fig. 5: Desviaciones entre los valores de las variables que describen los ciclos estándar y los datos experimentales

más simples (tipos 1 y 2) tienen mayor representatividad. Sin embargo, los conglomerados 5 a 8 presentan frecuencias significativas de tipologías superiores al tipo 10, que no han sido considerados en la construcción del ciclo estándar, lo que conlleva mayores desviaciones. Este aspecto es especialmente relevante en el conglomerado 7, donde la presencia de ciclos de tipo 11 o superior representa más del 37%, dado que una parte significativa de los recorridos transcurren por vías no urbanas. El análisis de los índices de semejanza permite obtener similares conclusiones, al presentar valores altos en los conglomerados 1, 3 y 4, y uno significativamente más bajo en el 7. Este hecho denota la limitación en la aplicación de la metodología propuesta, con errores contenidos cuando es aplicada a entornos urbanos.

Por último, cabe indicarse que todo el desarrollo, así como la validación de los resultados finales, han sido realizados en base a variables cinemáticas aunque, estando el uso de los ciclos orientado a la medida o estimación de consumo y emisiones, una validación tomando estas variables en consideración sería útil. Sin embargo, en este trabajo se pretende comprobar, sin tener que recurrir a instrumentación más compleja e intrusiva, si los ciclos construidos representan fielmente el funcionamiento de los vehículos, con independencia de la aplicación posterior de los mismos.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una metodología que permite la definición de ciclos de conducción estándar para autobuses urbanos. La particularidad del proceso reside en dos aspectos principales.

Por un lado, no se considera un único ciclo para todas las líneas de una ciudad, asumiendo que puede haber diferencias significativas entre ellas. Este hecho requiere plantear un método que permita agrupar las líneas en conglomerados de características cinemáticas homogéneas.

Adicionalmente, la generación de los ciclos estándar es realizada en base al estudio de las configuraciones de microciclos poligonales más frecuentes, comprobándose que, con respecto a los datos medidos, las variables de los ciclos sintetizados presentan desviaciones aceptables en los indicadores de calidad. En este sentido, si se desea que el número de microciclos diferentes sea reducido, es preciso descartar configuraciones que pueden no tener una representatividad significativamente menor a otros si tomados, pero la elección de los microciclos menos significativos puede conllevar a una explosión del número de microciclos más característicos si la diferencia en los datos experimentales entre ellos es notable. Esto obliga a adoptar criterios de compromiso para la generación de ciclos que se asemejen de forma aceptable a la realidad, pero cuya duración sea tal que sean realizables con facilidad. A pesar de las anteriores limitaciones, el método se ha mostrado efectivo en rutas con un perfil eminentemente urbano (conglomerados 1, 3 y 4 en los que son frecuentes las tipologías 1 y 2 de microciclos), ya que, según

la tabla 3 los índices de semejanza son superiores a 0.8 y las desviaciones en la figura 5 quedan aceptablemente acotadas (inferiores al 10% en la mayoría de las variables analizadas). Esto no ocurre de igual forma con líneas con un perfil más interurbano, con mayores desviaciones e índices de semejanza inferiores. Los ciclos pueden ser fácilmente replicados en un banco de pruebas, debiéndose determinar previamente las condiciones de ensayo en cuanto a carga según sea el entorno de explotación de los vehículos.

Finalmente, conviene enfatizar que el desarrollo de ciclos cinemáticos diferenciados según las características de las rutas, a diferencia de los trabajos previos que no contemplan tal posibilidad [18-24], permite realizar un estudio específico de cómo se comportaría cada vehículo en cada una de ellas, pudiéndose analizar si, con el fin de reducir consumo y emisiones, un determinado vehículo o tecnología es más o menos apropiado para cada tipo de ruta. Con ello, resulta factible conseguir una mejor distribución de la flota o la renovación de ésta empleando criterios más racionales. La metodología propuesta permite incrementar la fiabilidad en las estimaciones de consumo y emisiones ante cambios o reorganizaciones de flota, respecto a las técnicas actuales, basadas principalmente en datos macroscópicos. Es decir, el trabajo desarrollado ofrece una herramienta que facilita la toma de este tipo de decisiones en base a criterios más técnicos que los actualmente empleados, fundados en consideraciones sociales, políticas u organizativas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración prestada por la Empresa Municipal de Transportes de Madrid durante la realización de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] André M. *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles*. Francia: INRETS. Junio 2004. Report INRETS_LTE 0411.
- [2] Degobert P. *Automobiles and pollution*. Francia: Editions Technip. Institut Français du Pétrole Publications, 1995. 493 p. ISBN: 978-2710806769.
- [3] Gandhi KK, Zvonow VA, Singh H. "Development of a driving cycle for fuel economy in a developing country". *Transportation Research Part A*. 1983. Vol.17-1, p.1-11.
- [4] Clark NN, Gautam M, Lyons DW, et al. *Natural gas and diesel transit bus emissions: Review and recent data*. EE.UU. SAE. 1997. SAE paper 973203. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/973203>.
- [5] Cabrera-Montiel W, Tapia-Fernández S, Jiménez-Alonso F, et al. "Optimización de consumo de combustible de vehículos basada en programación dinámica". *Dyna, Ingeniería e Industria*. 2012. Vol.87-5, p.574-583. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4582>
- [6] Clark NN, Rapp BL, Gautam M, et al. *A long term field emissions study of natural gas fueled refuse haulers in New York City*. EE.UU. SAE. 1998. SAE paper 982456. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/982456>.
- [7] Reichart G, Friedmann S, Dorner C, et al. "Potentials of BMW driver assistance to improve fuel economy". En: *Actas del 4º Congreso Mundial de la Automoción del FISITA*. Paris, Francia. 27 de septiembre-1 de octubre de 1998.

- [8] Berry IM. "The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of U.S. light-duty vehicles". Director: Heywood J. Massachusetts Institute of Technology. 2010.
- [9] Lin J, Niemeier DA. "Regional driving characteristics, regional driving cycles". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2003. Vol.8-5, p.361-381. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209\(03\)00022-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209(03)00022-1).
- [10] André M, Joumard R, Vidon R, et al. "Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars". *Atmospheric Environment*. 2006. Vol.40-31, p.5944-5953. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12057>.
- [11] Hung WT, Tong HY, Lee CP, et al. "Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2007. Vol.12-2, p.115-128. ISSN: 1361-9209. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>.
- [12] André M, Pronello C. "Relative influence of acceleration and speed on emissions under actual driving conditions". *International Journal of Vehicle Design*. 1997. Vol.18, p.340-353.
- [13] Pelkmans L, Debal P. "Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles". *Transportation Research Part D*. 2006. Vol.11, p.233-241. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2006.04.001>.
- [14] Sun P, Chul-Hong K, Chan-Jo K. *Development of the urban driving cycle in Seoul*. EE.UU. SAE. 1989. SAE Technical Paper 891354.
- [15] Kent JH, Allen GH, Rule G. "A driving cycle for Sydney". *Transportation Research*. 1978. Vol.12-3, p.147-152. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(78\)90117-X](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(78)90117-X).
- [16] Kuhler M, Karstens D. *Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions*. EE.UU. SAE. 1978. SAE Technical Paper 780650. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/780650>.
- [17] Casanova-Kindelán J, Valdés-del Fresno M, Ariztegui-Cortijo J. "The influence of car fleet composition on urban pollutant emissions. Application to the city of Madrid". En: *Actas del 10º Simposio de Transport and Air Pollution*. Boulder, EE.UU. 17-19 de septiembre de 2001.
- [18] André M, Villanova A. "Characterisation of an urban bus network for environment purposes". *Science of the Total Environment*. 2004. Vol.334-335, p.85-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.071>.
- [19] Nylund N-O, Erkkilä K, Lappi M, et al. *Transit bus emission study: Comparison of emissions from diesel and natural gas buses*. Finlandia: VTT. 2004. Research project PRO3/P5150/04.
- [20] van de Weijer CJT, van der Graff R, Hendriksen P, et al. "Urban bus driving cycle". En: *Actas de la 4ª Conferencia Internacional del EAEC*. Estrasburgo, Francia. Junio de 1993.
- [21] André M, Garrot B, Roynard Y, et al. "Operating conditions of buses in use in the Ile-de-France region of France for the evaluation of pollutant emissions". *Atmospheric Environment*. 2005. Vol.39-13, p.2411-2420. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10018>.
- [22] Terrón-Alonso JA. "Modelización y optimización de la circulación de autobuses en circuitos con regulación semafórica". Director: Aparicio-Izquierdo F. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Transporte. 1990.
- [23] Gómez-Moñux F. "Contribución a la optimización energética de vehículos propulsados por sistemas híbridos". Director: Casanova-Kindelán J. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.
- [24] Jiménez-Alonso F, López-Martínez JM, Aparicio-Izquierdo F, et al. "Comparación de tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes en autobuses urbanos". *Dyna, Ingeniería e Industria*. 2009. Vol.84-1, p.33-37.
- [25] Hjalmdahl M, Várhelyi A. "Validation of in-car observations, a method for driver assessment". *Transportation Research Part A*. 2004. Vol.38-2, p.127-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2003.09.001>.
- [26] Han J, Kamber M, Pei J. *Data mining: Concepts and techniques, 3rd Edition*. Burlington (EE.UU.): Morgan Kaufmann Publishers, 2011. 744 p. ISBN: 978-0123814790.
- [27] Peña-Sánchez de Rivera D. *Fundamentos de estadística*. Madrid: Alianza Editorial, 2001. 688 p. ISBN: 978-8420686967.